

氏 名	立 神 久 雄
生 年 月 日	
本 籍	新潟県
学 位 の 種 類	博士(工学)
学 位 記 番 号	博甲第485号
学位授与の日付	平成14年3月22日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	波形鋼板ウェブPC箱桁橋のせん断特性および動的特性に関する研究
論文審査委員(主査)	梶川 康男(自然科学研究科・教授)
論文審査委員(副査)	川村 満紀(工学部・教授) 前川 幸次(工学部・教授) 近田 康夫(自然科学研究科・助教授) 園田恵一郎(大阪工業大学工学部・教授)

## 学 位 論 文 要 旨

Composite Prestressed Concrete bridges with corrugated steel webs have been the focus in the recent years due to their excellent characteristics as well as economical and construction advantages. As such, it is anticipated that construction of such bridges would increase in future. However, there is a need to understand the static and dynamic characteristics of such bridges. In this research, extensive analytical studies were carried out using three dimensional FEM analysis and dynamic simulation. In addition, the behavior of actual bridges under static and moving vehicular loads was investigated to verify the static and dynamic characteristics. Based on these results, a rational design methodology is proposed to increase the construction of such bridges.

本論文は、近年の国際化、要求多様化、高齢化社会、社会資本投資減少などの中で、経済性と施工性に優れ、今後建設される橋梁の中で有力な構造形式として注目されている、波形鋼板ウェブPC橋を対象に、その合理的な設計法から施工法の確立に資するために実施した実験的ならびに数値的解析研究をまとめたものである。本論文がこの種の波形鋼板ウェブPC橋の計画、設計、施工を行う上で、大きく貢献できれば幸いである。本論文は全7章から構成されており、本研究で得られた各章ごとの主な結論は、以下の通りである。

第1章では、プレストレストコンクリート橋の歴史から本研究の背景と意義を説明し、本研究の対象とした波形鋼板ウェブPC橋が経済性、施工性に優れた構造であることを示し、本論文の位置付けと目的を明らかにするとともに、本論文を構成する各章の概要を示した。

第2章では、波形鋼板ウェブPC橋の基本特性を示すとともに、コンクリート床版と波形鋼板ウェブで構成されている主桁の剛性評価、特に、せん断剛性、ねじり剛性について、3次元FEM解析結果より、その評価方法の提案を行っている。

また、本形式橋梁のような合成構造において重要な、コンクリート床版と波形鋼板ウェブの接合部に対する押し抜きせん断の実験を行い、その挙動を確認している。本実験においては、各種接合方法（スタッドジベル接合・アングルジベル接合・パーフォボンドリブ接合）に対して、その挙動および耐力の確認を行い、さらに、これらの接合に対して普通コンクリートと高性能軽量コンクリートを用いた場合の比較も行っている。そして、首振りモーメントにも対応できる、パーフォボンドリブを2枚使用した新しい接合方法を提案している。これらの実験および解析により、以下のような結論を得た。

まず、2.2節・波形鋼板を有するPC箱桁橋のせん断およびねじり特性に関する研究では、波形鋼板の波の形状や波形鋼板の高さに対する箱桁断面のねじり挙動及び波形鋼板の高さや荷重の種類に対する曲げせん断挙動を解明するために、3次元のFEM解析を行い、実用設計に用いられる棒の純ねじり理論とはりの曲げせん断理論との比較を行い、以下に示す結果を得た。

- (1) 波形鋼板をウェブに用いたPC箱桁橋のねじり特性に対し、箱桁の断面形状を考慮できる修正係数 $\alpha$ を導入した式を用いることにより、箱桁断面形状や波形鋼板の波の形状を考慮した棒としてのねじり定数やねじりせん断応力を精度よく計算できることがわかった。
- (2) 曲げせん断変形については、波形鋼板の形状に関する係数（ $\gamma$ ）を導入したせん断剛性を用いることにより、波形鋼板の高さや載荷荷重の種類に関係なくせん断変形量をはり理論により精度良く計算できることが分かった。
- (3) ねじり挙動におけるそり応力については、ねじりモーメントが卓越するような桁橋の場合には、特に、連続桁の支点部付近の桁上縁の引張りが卓越する部分については、曲げ応力に若干の余裕を持たせるのが望ましいと考えられる

つぎに、2.3節・波形鋼板と軽量コンクリート床版の接合方法に関する実験的研究では、高性能軽量骨材（HLA）コンクリートを用いた波形鋼板ウェブ橋の上下床版の接合部において、スタッドジベル、パーフォボンドリブおよびアングルジベルをずれ止めとして使用した場合の性状について、以下のことがわかった。

- (1) 設計荷重時レベル（耐力の1/3）では、スタッドジベル、パーフォボンドリブおよびアングルジベルとも、ずれがほとんど発生していないことがわかった。
- (2) スタッドジベルの耐力は、逆打ちで横方向プレストレスを考慮しない場合は、Fisherが提案したスタッドジベルの耐力式に安全係数0.85を考慮すればよいことがわかった。
- (3) パーフォボンドリブの耐力は、新谷らの提案したパーフォボンドリブの耐力式をそのまま用いてよいことがわかった。
- (4) アングルジベルの耐力も、フランスの基準によるアングルジベルの耐力式を、そのまま用いてよいことがわかった。

さらに、2.4 節・パーフォボンドを用いたずれ止め構造のせん断特性に関する実験的研究では、一連の実験から波形鋼板ウェブ橋の床版の接合部において、パーフォボンドリブをずれ止めとして使用した場合の性状について、以下のことがわかった。

- (1) 設計荷重時レベル（耐力の 1/3）では、パーフォボンドリブは、ずれがほとんど発生していないことがわかった。
- (2) 2 枚パーフォボンドリブの耐力は、新谷らの提案したパーフォボンドリブの耐力式で評価できることがわかった。
- (3) 本節で提案した 2 枚パーフォボンドリブ（チャンネルタイプ）接合形式は、上床版の接合構造とし水平せん断力および橋軸直角方向の曲げモーメントに十分に抵抗する構造であると考えられる。

第 3 章では、わが国で、2 番目にピロン柱を用いた押出し工法により建設された銀山御幸橋（5 径間連続波形鋼板ウェブ PC 箱桁橋）で行われた 3 回にわたる実橋車両走行実験の結果を基に、波形鋼板ウェブ PC 橋の振動特性の確認を行っている。まず、第 2 章で提案した主桁剛性評価の確認のために、3 次元梁理論解析と実験値の比較を行い、その妥当性の検証を行っている。そして、全体構造の振動特性、波形鋼板ウェブの振動特性および外ケーブルの振動特性を確認した。また、本形式橋梁の減衰定数および動的増幅率に対しても確認している。これらの実験および解析により、以下のような結論を得た。

- (1) 静的たわみおよび主桁の固有振動数は、解析値、実験値とも一致しており、主桁の剛性評価、および構造全体のモデル化の妥当性が確認された。
- (2) 車両が走行した際、波形鋼板ウェブにおいて大きな振動振幅を生じることはなかった。また、波形鋼板ウェブで観測されたスペクトルから、床版上と同様な卓越振動数が見られ、特別に単独で振動するような挙動は見られなかったことから、交通振動による接合部などの疲労の問題は無いと考えられる。
- (3) 外ケーブルの主桁や車両との共振性については、本実験から確認されなかった。また、実験で得られた外ケーブルの振動数は、解析値とよく一致していた。
- (4) 車両走行による振動により発生する定着部およびデビエータ部付近の局部応力は、疲労が問題となる応力変動ではなかった。
- (5) 外ケーブルに張力を導入する前後で、主桁の振動数はほとんど変わらなかった。
- (6) 実験車両が、走行速度 40km/h 以下で走行した場合、動的増幅率は、設計で用いた衝撃係数程度となっていた。

第 4 章では、長野県において、固定式支保工工法により建設された白沢橋（波形鋼板ウェブ PC 単純箱桁橋：曲率半径  $R=250\text{m}$ ）で行われた実橋静的載荷実験および実橋車両走行実験の結果を基に、各種検証を行った。

本研究においては、合成構造である波形鋼板ウェブ PC 橋の各部材（コンクリート部材：上下床版、鋼部材：波形鋼板ウェブ）のせん断分担を考慮できる、3 次元 FEM 解析モデルを構築した。そして、各部材のせん断分担を考慮したせん断変形の影響を検証するために、

3次元梁理論解析（格子モデル）、3次元FEM解析（上下床版、ウェブともSHELL要素）および3次元FEM解析（上下床版=SOLID要素、ウェブ=SHELL要素）の比較を行った。また、構築した3次元FEM解析モデルを用い、主桁各部材のひずみエネルギーより各モード減衰の提案を行っている。これらの実験および解析により、以下のような結論を得た。

- (1) 静的挙動は各載荷実験から判断すると、梁理論解析における剛性評価は、波形鋼板のせん断変形を考慮し、かつ、波形鋼板の負担するせん断を考慮すれば、本形式の橋梁の変形量は精度良く評価できることがわかった。
- (2) 静的たわみおよび固有振動数から判断すると、本橋のねじり挙動は単純ねじりを基本としており、単純ねじりを基本としたねじり剛性評価式の妥当性が確認できた。
- (3) 隔壁間隔とねじり定数の相関図と外ケーブルの偏向位置を考慮して決定した隔壁間隔の妥当性が確認された。
- (4) ひずみエネルギー比から見ると、面外方向モードは、ひずみエネルギーが発生しておらず、波形鋼板ウェブの寄与がない。
- (5) 沓の影響が少ないねじり1次モードから判断すると、本研究においては、ひずみエネルギー比より減衰定数を算出する場合、コンクリート床版の等価減衰を1.0%、波形鋼板の等価減衰を0.5%とすれば評価できる。

第5章では、第3章で述べた銀山御幸橋をモデルとして、2次元5自由度系の車両モデルを用いて3次元梁理論解析による動的シミュレーション解析を行い、波形鋼板ウェブPC橋の衝撃係数（動的増幅率）の提案を行っている。この動的シミュレーション解析により、以下のような結論を得た。

- (1) 本形式橋梁の衝撃係数はPC橋よりも鋼橋に近い値を示していることの知見を得た。
- (2) 本形式橋梁のたわみや断面力に基づく衝撃係数は、中支間長の径間部では、その範囲を $2\sigma$ まで考えた場合でも、PC橋の設計衝撃係数よりも小さい値を示した。このことから、長・中支間長の波形鋼板ウェブPC橋では、PC橋の衝撃係数を用いても設計上問題がないことが確認された。
- (3) 断面力に基づく衝撃係数は、短支間長の径間部では、その範囲を $2\sigma$ まで考えた場合、PC橋の設計衝撃係数と同等か若干大きい値を示した。

第6章においては、材料面からは波形鋼板ウェブPC橋に着目して、高性能軽量骨材コンクリートを波形鋼板ウェブPC橋に適用した場合についての検討を行った。

従来、高性能軽量骨材コンクリートは、凍結融解作用に対する抵抗性やポンプ圧送の問題が指摘されていたが、最近、比重が0.8および1.2で、強度が従来の軽量骨材の2倍以上であり、吸水率がそれぞれ5%および3%に低減された高性能軽量骨材が開発され、これらと波形鋼板ウェブPC橋を組合せた場合の試設計を行っている。

また、高性能骨材コンクリートを波形鋼板ウェブPC橋に用いた場合には、さらに死荷重が軽減されることから、車両走行により励起されるHLAコンクリート床版の振動、動的増幅率、ウェブとの接合部における疲労、低周波音など橋梁振動の問題が生じる可能性が

あるため、シミュレーション解析を行い、静的特性および動的特性の検討を行っている。

本研究においては、車両が走行した時の橋梁全体の振動特性に加えて、上床版の振動および波形鋼板ウェブと上床版の接合部近傍の動的な影響を比較することであるが、解析モデルとしては、梁理論解析モデルでは、これらの挙動を追うことが出来ないため、3次元FEM解析（上下床版、ウェブともSHELL要素）により検証を行った。

この試設計および動的シミュレーション解析により、以下のような結論を得た。

- (1) 試設計結果より、HLAコンクリートを用いたPC橋の重量は、普通骨材コンクリートを用いたPC橋に比べ79%に低減された。さらに、波形鋼板ウェブとHLAコンクリートを組み合わせたPC橋の重量は、67%と、飛躍的に重量が低減された。
- (2) 196kN車を移動載荷したときのたわみ量は、普通骨材コンクリートを用いたPC橋(NPC)、普通骨材コンクリートを用いた波形鋼板ウェブPC橋(NCR)、HLAコンクリートを用いたPC橋(LPC)、HLAコンクリートを用いた波形鋼板ウェブPC橋(LCR)の順番で大きくなった。
- (3) 床版支間中央の静たわみは、支間長45.0m、60.0mとも普通骨材コンクリートPC橋、HLAコンクリートPC橋、普通コンクリート波形鋼板ウェブPC橋、HLAコンクリート波形鋼板ウェブPC橋の順でたわみ量は大きくなっている。また、HLAコンクリートPC橋と普通コンクリート波形鋼板ウェブPC橋の差は僅かであり、ウェブ剛性と床版剛性の関係が微妙に寄与しているものと考えられる。
- (4) 固有振動数は、各支間長ともに、たわみ対称1次振動およびねじれ振動1次についてはHLAコンクリート波形鋼板ウェブPC橋が最も低い振動数を有する結果となった。
- (5) 支間長45.0mの普通骨材コンクリート波形鋼板ウェブPC橋およびHLAコンクリート波形鋼板ウェブPC橋では、ねじれ1次振動モードが2番目に現れ、出現順序に変化が生じた。これは、PC橋と波形鋼板ウェブPC橋のねじり剛性の差および支間長の違いによる隔壁間隔が影響していると考えられる。
- (6) 支間中央における鉛直変位の動的増幅率( $DIF$ )は、支間長60.0m、45.0mとも、走行速度が増加するとともに $DIF$ が増加する傾向にあり、支間長45.0mの場合は、支間長60.0mよりも大きい値を示している。
- (7) 支間中央における鉛直変位の $DIF$ は、普通骨材コンクリートを用いた場合の方がHLAコンクリートを用いたものより大きな値を示した。これは、動的応答値に比べ静的鉛直変位が大きく出ていたため、 $DIF$ は小さい値を示した。
- (8) 上床版における曲げモーメントの $DIF$ は、各走行ケースとも、波形鋼板ウェブPC橋の方が大きな値を示した。
- (9) 波形鋼板ウェブにおける曲げモーメントの $DIF$ は、支間長60.0m、45.0mとも走行速度が速くなると顕著に大きくなった。

## 学位論文審査結果の要旨

当該学位申請論文に関し、平成 14 年 1 月 22 日に第 1 回審査委員会を開催し、論文内容を検討した。さらに、平成 14 年 1 月 31 日の口頭発表会の後に開催した第 2 回学位論文審査会において協議した結果、以下のように判定した。

本論文は波形鋼板ウェブ PC 箱桁橋を対象に有限要素法による静的ならびに動的な数値解析シミュレーションや実橋における載荷試験を通して、その静的特性、動的特性を究明し、本構造形式橋梁の合理的な設計法や施工法に関する研究である。

まず、波形鋼板ウェブを用いた実橋（単純 PC 箱桁橋と 5 径間連続 PC 箱桁橋）について、その静的特性、特にせん断変形の影響を検証するとともに、全体構造の振動特性ならびに動的増幅率の提案をし、さらに波形鋼板ウェブの振動および外ケーブルの振動など局所的な動的特性に対しても検討し、その特性について明らかにし、実験でも確認している。

つぎに、高性能軽量骨材コンクリートを波形鋼板ウェブ PC 橋に用いた場合には、死荷重が軽減されることから、車両走行により励起される HAL コンクリート床版の振動、動的増幅率、ウェブとの接合部における疲労や低周波音など橋梁振動の多くの問題が生ずる可能性があることから、数値解析を行い、静的特性および動的特性の検討を行った。

以上、本論文の成果は波形鋼板ウェブ PC 箱桁橋の設計・施工技術に大きく寄与するものであり、工学上有用な知見を得たものと認められる。よって、本論文は博士（工学）論文に値すると判定した。